

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-130961

(43)Date of publication of application : 09.05.2002

(51)Int.Cl.

F27D 19/00

F27D 21/00

(21)Application number : 2000-329717

(71)Applicant : TOKYO ELECTRON LTD

(22)Date of filing : 27.10.2000

(72)Inventor : O BUNRYO

SUZUKI FUJIO

SAKAMOTO KOICHI

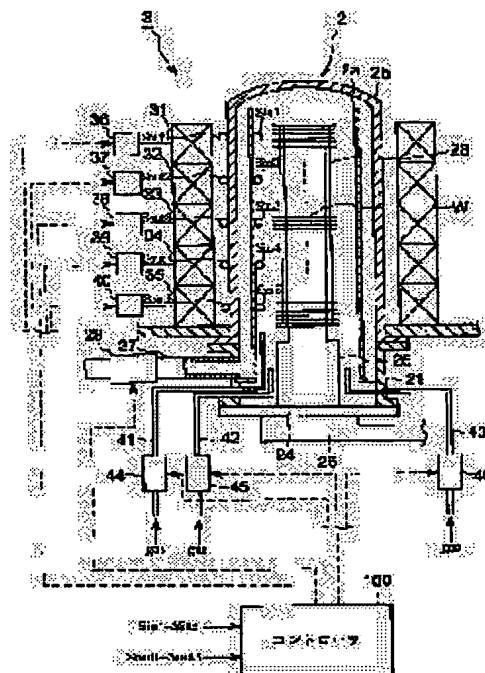
YASUHARA MOYURU

(54) METHOD FOR CALIBRATING THERMAL TREATING DEVICE AND FOR FORMING AND CALIBRATING MATHEMATICAL MODEL THEREOF

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To calibrate and form a mathematical model to estimate the temperature of a substance to be treated.

SOLUTION: A method for forming a temperature estimated mathematical model for the thermal treating device formed that the output of a temperature sensor situated in a heating furnace is applied for a temperature estimated mathematical model to estimate the temperature of a wafer, and the heating furnace is controlled according to an estimated temperature. N-sets of temperature sensors are situated in positions of $R_1 \dots R_n$ where a distance from a wafer center satisfies a formula 1. The wafers are contained in the heating furnace and by obtaining the outputs of the sensor of the heating furnace and the output of the sensor of a wafer, a temperature estimated mathematical model is produced. Through similar processing, a relation between an actual measurement and an estimated value is determined to calibrate the temperature estimated mathematical model. Formula 1 is $K_1 \cdot \pi R_1^2 = \dots = K_{n+1} \cdot \pi (R_2 - R_n^2)$, where $K_1 - K_{n+1}$ is a yield of an element with which a distance from a wafer center is obtained from $n+1$ regions intercepted by a circle of $R_1 - R_n$.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-130961

(P2002-130961A)

(43) 公開日 平成14年5月9日(2002.5.9)

(51) Int.Cl.⁷

F 2 7 D 19/00

21/00

識別記号

F I

F 2 7 D 19/00

21/00

データベース*(参考)

A 4 K 0 5 6

C

審査請求 未請求 請求項の数4 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2000-329717(P2000-329717)

(22) 出願日 平成12年10月27日(2000.10.27)

(71) 出願人 000219967

東京エレクトロン株式会社

東京都港区赤坂5丁目3番6号

(72) 発明者 王 文峻

神奈川県津久井郡城山町町屋1丁目2番41号 東京エレクトロン東北株式会社相模事業所内

(72) 発明者 鈴木 富士雄

神奈川県津久井郡城山町町屋1丁目2番41号 東京エレクトロン東北株式会社相模事業所内

(74) 代理人 100095407

弁理士 木村 満

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 熱処理装置の校正方法及び熱処理装置の数学モデル生成・校正方法

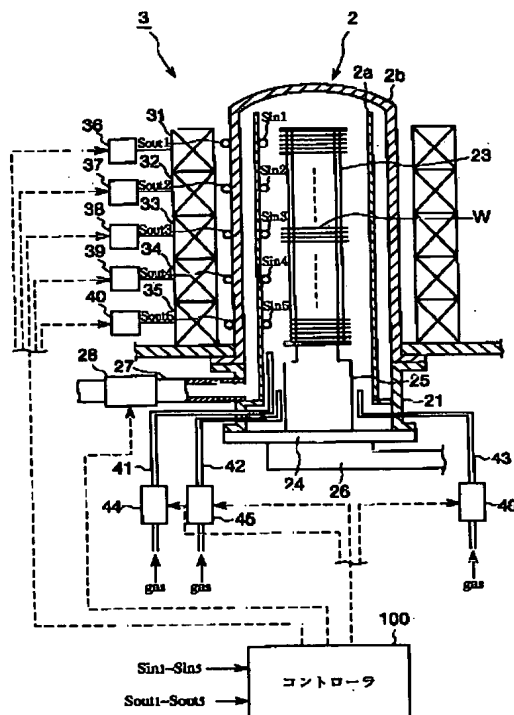
(57) 【要約】

【課題】 被処理体の温度を推定する数学モデルを作成・校正する。

【解決手段】 加熱炉に配置された温度センサの出力を、温度推定数学モデルに適用して、ウエハの温度を推定し、推定温度に従って、加熱炉を制御する熱処理装置用温度推定数学モデルの作成方法であって、 n 個の温度センサを、ウエハ中心からの距離が数式1を満たす $R_1 \dots R_n$ の位置に配置し、ウエハを加熱炉内に収容し、加熱炉のセンサとウエハのセンサとの出力を取得して、温度推定数学モデルを生成する。同様の処理で、実測値と推定値の関係を求め、温度推定数学モデルを校正する。

【数1】 $K_1 \cdot \pi R_1^2 = \dots = K_{n+1} \cdot \pi (R_n^2 - R_{n+1}^2)$

$K_1 \sim K_{n+1}$ はウエハ中心からの距離が $R_1 \sim R_n$ の円で区切られた $n+1$ 個の領域から得られる素子の歩留率。



【特許請求の範囲】

【請求項1】半径がRの円形の基板を収納し、該基板の温度を測定しつつ円形の基板に処理を施す熱処理装置の校正方法であって、

n個の温度センサを、基板中心からの距離 R_1 、 R_2 、...、 R_n が数式1を満たす位置に配置し、n個の温度センサから得られた基板温度に基づいて、前記熱処理装置の動作を校正する、ことを特徴とする熱処理装置の校正方法。

【数1】 $K_1 \cdot \pi R_1^2 = K_2 \cdot \pi (R_2^2 - R_1^2)$ 、...、 $= K_{n+1} \cdot \pi (R^2 - R_n^2)$
 ここで、 K_1 は、基板の中心からの距離（半径）が R_1 の円で区切られた部分から得られる素子の歩留まり率、 K_x （ $x=2, 3, \dots, n$ ）は、基板の中心からの距離が R_{x-1} 及び R_x 、である2つの同心円で区切られた部分の素子の歩留まり率、 K_{n+1} は、基板の中心からの距離が R_n 及び R である2つの同心円で区切られた部分の素子の歩留まり率である。

【請求項2】半径がRの円形の基板を収納し、該基板の表面温度を、所定の数学モデルを用いて推定しながら、推定した温度に従って基板に熱処理を施す熱処理装置の数学モデルを校正する方法であって、

n個の温度センサを、基板中心からの距離が数式2を満たす R_1 、 R_2 、...、 R_n の位置に配置して基板温度を測定し、

数学モデルを用いて基板温度を推定し、

n個の温度センサにより実測された基板温度と、数学モデルを用いて推定した基板温度とを比較して、数学モデルを校正する、ことを特徴とする熱処理装置の数学モデルを校正する方法。

【数2】 $K_1 \cdot \pi R_1^2 = K_2 \cdot \pi (R_2^2 - R_1^2)$ 、...、 $= K_{n+1} \cdot \pi (R^2 - R_n^2)$
 K_1 は、基板の中心からの距離（半径）が R_1 の円で区切られた部分から得られる素子の歩留まり率、 K_x （ $x=2, 3, \dots, n$ ）は、基板の中心からの距離が R_{x-1} 及び R_x 、である2つの同心円で区切られた部分の素子の歩留まり率、 K_{n+1} は、基板の中心からの距離が R_n 及び R である2つの同心円で区切られた部分の素子の歩留まり率である。

【請求項3】複数のヒータと、複数の温度センサとを備え、内部に円形の基板を収容する加熱炉と、前記温度センサの出力から、前記加熱炉内の基板の温度を推定するための温度推定数学モデルを記憶するメモリと、前記メモリに記憶されている温度推定数学モデルに基づいて、前記温度センサの出力から前記基板の温度を推定し、この推定に従って、前記複数のヒータを制御する制御手段と、を備えるバッチ式熱処理装置の温度推定の数学モデルを生成する方法であって、

n個の温度センサを、基板中心からの距離が数式3を満たす R_1 、 R_2 、...、 R_n の位置に配置し、

温度センサが配置された基板を前記加熱炉内に収容し、前記ヒータに通電して、前記加熱炉の複数の温度センサと基板上の温度センサとの出力を取得して、取得したデータから、前記加熱炉の複数の温度センサの出力から基板の温度を求める前記温度推定数学モデルを生成する、ことを特徴とする熱処理装置の温度推定用数学モデルの生成方法。

【数3】 $K_1 \cdot \pi R_1^2 = K_2 \cdot \pi (R_2^2 - R_1^2)$ 、...、 $= K_{n+1} \cdot \pi (R^2 - R_n^2)$
 K_1 は、基板の中心からの距離（半径）が R_1 の円で区切られた部分から得られる素子の歩留まり率、 K_x （ $x=2, 3, \dots, n$ ）は、基板の中心からの距離が R_{x-1} 及び R_x 、である2つの同心円で区切られた部分の素子の歩留まり率、 K_{n+1} は、基板の中心からの距離が R_n 及び R である2つの同心円で区切られた部分の素子の歩留まり率である。

【請求項4】数式3を満たす位置に温度センサを備えるテスト用基板を用いて基板温度を測定し、請求項3に記載の方法で生成された数学モデルを用いて基板温度を推定し、

n個の温度センサにより実測された基板温度と、数学モデルを用いて推定した基板温度とを比較して、数学モデルを校正する、ことを特徴とする数学モデルの校正方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体ウエハ等の円形の基板からなる被処理体を多数枚一括して熱処理するバッチ式熱処理装置と熱処理装置用の温度推定用とその制御方法に関し、特に、収容している被処理体の温度を適切に測定し、測定結果に基づいて、最適な制御を行う適応制御型のバッチ式熱処理装置及びその制御方法に関する。

【0002】

【従来の技術】米国特許第5,517,594号公報等には、バッチ式の熱処理装置において、数学モデルを使用して、ウエハの温度を推測し、推定した温度に基づいて熱処理を実行する技術が開示されている。この技術によれば、数学モデルを作成する段階及び数学モデルを調整する段階で、熱処理装置内にセットされたウエハの実際の温度を測定する必要がある。ウエハの直径が200mmの時代、ウエハの温度の測定は、ウエハの中心と端部とに温度センサを設置して行われていた。近時、ウエハの直径は300mmが主流になりつつある。ウエハが300mmの場合、ウエハの中心と端部の温度を測定し、測定値を使用するだけでは、高精度のモデルを作成及び校正することができない。ひいては、被処理体の温度を適切に推定して熱処理の制御を行うことができなくなってしまう。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、上記実状に鑑みてなされたものであり、被処理体の温度を推定するための数学モデルを適切に作成し、さらに、校正可能とすることを目的とする。また、本発明は、被処理体の温度を適切に推定して、適切な熱処理を施すことを他の目的とする。

【0004】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するため、この発明の第1の観点に係る熱処理装置の校正方法は、半径が R の円形の基板を収納し、該基板の温度を測定しつつ基板に処理を施す熱処理装置の校正方法であって、 n 個の温度センサを、基板中心からの距離 R_1 、 R_2 、 \dots 、 R_n が数式1を満たす位置に配置し、 n 個の温度センサから得られた基板温度に基づいて、前記熱処理装置の動作を校正する、ことを特徴とする。

【0005】この手法により、各温度センサの出力を等しい重みで処理して、前記熱処理装置の動作を校正することが可能となる。

【0006】上記目的を達成するため、この発明の第2の観点に係る数学モデルの校正方法は、半径が R の円形の基板を収納し、該基板の表面温度を、所定の数学モデルを用いて推定しながら、推定した温度に従って基板に熱処理を施す熱処理装置の数学モデルを校正する方法であって、 n 個の温度センサを、基板中心からの距離が数式2を満たす R_1 、 R_2 、 \dots 、 R_n の位置に配置して基板温度を測定し、数学モデルを用いて基板温度を推定し、 n 個の温度センサにより実測された基板温度と、数学モデルを用いて推定した基板温度とを比較して、数学モデルを校正する、ことを特徴とする。

【0007】この手法により、各温度センサの出力を等しい重みで処理して、数学モデルを校正することが可能となる。

【0008】また、上記目的を達成するため、この発明の第3の観点に係る熱処理装置の温度推定用の数学モデルを生成する方法は、複数のヒータと、複数の温度センサとを備え、内部に円形の基板を収容する加熱炉と、前記温度センサの出力から、前記加熱炉内の基板の温度を推定するための温度推定数学モデルを記憶するメモリと、前記メモリに記憶されている温度推定数学モデルに基づいて、前記温度センサの出力から前記基板の温度を推定し、この推定に従って、前記複数のヒータを制御する制御手段と、を備えるバッチ式熱処理装置の温度推定用の数学モデルを生成する方法であって、 n 個の温度センサを、基板中心からの距離が数式3を満たす R_1 、 R_2 、 \dots 、 R_n の位置に配置し、温度センサが配置された基板を前記加熱炉内に収容し、前記ヒータに通電して、前記加熱炉の複数の温度センサと基板上の温度センサとの出力を取得して、取得したデータから、前記加熱炉の複数の温度センサの出力から基板の温度を求める前記温度推定数学モデルを生成する、ことを特徴とする。

【0009】さらに、このようにして生成された数学モデルを、数式3を満たす位置に温度センサを備えるテスト用基板の基板温度を測定し、上記方法で生成された数学モデルを用いて基板温度を推定し、 n 個の温度センサにより実測された基板温度と、数学モデルを用いて推定した基板温度とを比較して、数学モデルを校正してもよい。

【0010】この手法により、各温度センサの出力を等しい重みで処理して、前記数学モデルを作成し、校正することが可能となる。

【0011】

【発明の実施の形態】本発明のバッチ式熱処理装置用の数学モデルの作成方法及び構成方法の実施の形態について説明する。始めに、熱処理装置及び数学モデルについて図1～図4を参照して説明する。この実施の形態の縦型熱処理装置は、図1に示すように、例えば、石英で作られた内管2a及び外管2bよりなる二重管構造の反応管2を備え、反応管2の下側には金属製の筒状のマニホールド21が設けられている。内管2aは上端が開口されており、マニホールド21に支持されている。外管2bは有天井に形成され、下端がマニホールド21の上端に気密に接合されている。

【0012】反応管2内には、多数枚、例えば、150枚の被処理体を成す円形の基板であるウエハW（製品ウエハ）が水平な状態で、上下に間隔をおいてウエハ保持具であるウエハポート23に棚状に配置されている。このウエハポート23は蓋体24の上に保温筒（断熱体）25を介して保持されている。

【0013】反応管2の周囲には、例えば、抵抗体より成るヒータ部3が設けられている。ヒータ部3は、5段に配置されたヒータ31～35から構成される。ヒータ31～35には、電力コントローラ36～40より、それぞれ独立して電力が供給される。反応管2、マニホールド21、ヒータ部3により加熱炉が構成される。ヒータ31～35により、反応管内は、図3(a)に示すように5つのゾーンに分けられている。

【0014】また、マニホールド21には、内管2a内にガスを供給するように複数のガス供給管が設けられており、図1では、理解を容易にするため、3本のガス供給管41、42、43を示している。各ガス供給管41、42、43には、ガス流量を調整するためのマスフローコントローラ（MFC）などの流量調整部44、45、46を介してジクロロシラン、アンモニア、窒素がそれぞれ供給される。さらにマニホールド21には、内管2aと外管2bとの隙間から排気するように排気管27が接続されている。排気管27は、図示しない真空ポンプに接続されている。排気管27には、反応管2内の圧力を調整するための、コンビネーションバルブ、バタフライバルブやバルブ駆動部などを含む圧力調整部28が設けられている。

【0015】内管2aの内面には、垂直方向に一行に5つの熱電対（温度センサ）Sin1～Sin5が配置されている。熱電対Sin1～Sin5は、円形のウエハWの金属汚染を防止するため、例えば、石英のパイプ等によりカバーされており、図3（a）に示す5つのゾーンにそれぞれ配置されている。

【0016】また、外管2bの外面には、垂直方向に一行に複数の熱電対（温度測定部）Sout1～Sout5が配置されている。熱電対Sout1～Sout5も、図3（a）に示す5つのゾーンに対応して、それぞれ配置されている。

【0017】この縦型熱処理装置は、反応管2内の処理雰囲気（温度、ガス流量、圧力）といった処理パラメータを制御するための制御部（コントローラ）100を備えている。制御部100は、熱電対Sin1～Sin5とSout1～Sout5の出力信号を取り込み、ヒータ31～35の電力コントローラ36～40、圧力調整部28、流量調整部44～46に制御信号を出力する。

【0018】図2は、制御部100の構成を示す。図示するように、制御部100は、モデル記憶部111と、レシピ記憶部112と、ROM113と、RAM114と、I/Oポート115と、CPU116と、これらを相互に接続するバス117とから構成される。

【0019】モデル記憶部111は、熱電対Sin1～Sin5及びSout1～Sout5の出力信号（測定温度）からウエハポート23に載置されているウエハWの中心部と端部との温度を推定（計算）し、さらに、推定した温度を目標値に設定するためにヒータ31～35に供給すべき電流（電力）を指示するために設計されたモデル（数学モデル；高次・多次元関数）を温度帯域別に記憶している。なお、モデルの設計手法については後述する。

【0020】レシピ記憶部112には、この熱処理装置で実行される成膜処理の種類に応じて、制御手順を定めるレシピが記憶されている。各レシピは温度レシピ（処理対象たるウエハWが経るべき温度変化の目標値；温度目標軌道）を含んでいる。通常のバッチ処理の場合、1種類の成膜処理については、全ウエハについて1つの温度レシピが用意される。これに対し、この実施の形態においては、個々の熱処理装置の特性に応じて、面間及び面内で膜厚が均一に成るように、図3（a）に例示するように、反応管2内を縦方向に複数（5つ）のゾーンに分け、図3（b）に示すように、ゾーン毎に調整された温度レシピ（温度目標軌道）が用意されている。ゾーン毎に調整された温度レシピは、ガスの流量や濃度の差等の要因による膜厚のばらつきを温度制御で吸収（キャンセル）できるように調整されている。

【0021】ROM113は、EEPROM、フラッシュメモリ、ハードディスクなどから構成され、CPU116の動作プログラム等を記憶する記録媒体である。

【0022】RAM114は、CPU116のワークエリアなどとして機能する。I/Oポート115は、熱電

対Sin1～Sin5及びSout1～Sout5の測定信号をCPU116に供給すると共に、CPU116が出力する制御信号を各部へ出力する。また、I/Oポート115には、操作パネル118が接続されている。バス117は、各部の間で情報を伝達する。

【0023】CPU116は、DSPなどから構成されてもよく、ROM113に記憶された制御プログラムに従って動作し、操作パネル118からの指示に応答し、レシピ記憶部112に記憶されているレシピに従って、熱処理装置の動作を制御する。具体的には、CPU116は、モデル記憶部111に記憶されているモデルを読み出し、また、レシピ記憶部112に記憶されている複数のレシピの中から該当するものを選択して読み出す。そして、レシピに従って処理動作を実行する。特に、この実施の形態においては、CPU116は、熱電対Sin1～Sin5及びSout1～Sout5からの測定値及び電力コントローラ36～40への指示値（電力コントローラ36～40がヒータ31～35に供給した電力を示す値）を取り込んで、ウエハWの温度Twを刻一刻と推定し、推定した温度Twが温度レシピが指示する値に一致するように、電力コントローラ36～40に、供給電力を指示する。

【0024】また、CPU116は、通常の熱処理装置の制御と同様に、流量コントローラ44～46への指示、圧力調整部28への指示なども行う。

【0025】次に、上記構成のバッチ式熱処理装置による一般的な成膜処理について、図4を参照して説明する。まず、オペレータは、処理の内容（窒化膜の形成）を、操作パネル118より入力する。CPU116は、指示に応答し、窒化膜形成用のレシピをレシピ記憶部112から読み出す。一方、ウエハポート23に、製品ウエハ（処理対象のウエハ）Wが必要枚数載置される。次に、被処理体であるウエハWが所定枚数、例えば100枚搭載されたウエハポート23を、昇降台26によって上昇させてウエハWを反応管2内にロードし、マニホール21の下端のフランジと蓋体24とを気密状態とする。

【0026】CPU116は、ウエハポート23のロードが完了すると、ROM113から読み出したレシピに従って、圧力調整部28を含む排気系を制御して、排気動作を開始する。

【0027】一方、CPU116は、図4に示す昇温制御動作を開始し、ヒータ部3への電力の供給を開始して昇温を開始する（ステップS1）。さらに、CPU116は、熱電対Sin1～Sin5及びSout1～Sout5の出力信号及びヒータ31～35に供給するパワー（電力）の値を取り込む（ステップS2）。次に、Sin1～Sin5及びSout1～Sout5の出力信号から、ウエハWの温度が属す帯域を特定し、その帯域用のモデルに従って、上段（ゾーン1）、中上段（ゾーン2）、中段（ゾーン3）、中

下段（ゾーン4）、下段（ゾーン5）の5つのゾーンに配置されているウエハWの温度Tw1～Tw5を計算（推定）する（ステップS3）。

【0028】次に、ウエハWの温度Tw1～Tw5が目標値に達して、昇温処理が終了したか否かを判別し（ステップS4）、目標値に達していれば、昇温処理を終了し、一定温度を維持するための保温処理に移る。

【0029】一方、ステップS4で、目標値に達していないと判別された場合には、推定した各ゾーンのウエハWの温度Tw1～Tw5が全体として温度目標軌道（図3（b））が指示している温度の組み合わせに最も近づくように、ヒータ31～35に供給する電力を電力コントローラ36～40を介して制御する（ステップS7）。即ち、推定したウエハ温度に基づいて、ウエハWの温度を適応（アダプティブ）制御する。

【0030】例えば、5つのゾーンのウエハの温度がTw1～Tw5であると計算され、温度目標軌道が指示する温度がTt1、Tt2、Tt3、Tt4、Tt5である場合には、実際の温度と目標温度との差が全体として最も小さくなるように制御を行う。例えば、最小2乗法を用いて、 $(Tw1 - Tt1)^2 + (Tw2 - Tt2)^2 + (Tw3 - Tt3)^2 + (Tw4 - Tt4)^2 + (Tw5 - Tt5)^2$ が最小になるように、ヒータ31～35に供給する電力を個々に制御する。

【0031】その後、処理をステップS2に移し、熱電対Sin1～Sin5及びSout1～Sout5の出力信号とヒータ31～35に供給している電力値とを取り込んで、ヒータ31～35を制御する動作を繰り返す。

【0032】その後、処理をステップS2に移し、ヒータ31～35を制御する動作を繰り返す。

【0033】昇温が終了すると、CPU116は、各ゾーンの温度を一定に維持するように適応制御を続ける。

【0034】昇温終了後、反応管2内の温度が安定するのに十分な時間が経過すると、反応管2に処理ガスを供給し、成膜を開始する。成膜処理の間も、上段、中上段、中段、中下段、下段の各ゾーンのウエハWの温度が全体として温度目標軌道が規定する温度に最も近づくように温度制御を行う。このため、各ゾーンのウエハWは、異なる温度で成膜処理が成される。ただし、モデル及びレシビが、後述するように、均一な膜が形成できるように調整された値（成膜ガスの濃度や、ウエハの枚数や配置のばらつきの影響などを、熱に換算して調整された値）であるので、面間及び面内で比較的均一な厚さの膜が成長する。

【0035】成膜が終了すると、CPU116は、成膜ガスの供給を停止し、反応管2内にパージガスを供給して、成膜ガスをパージすると共に、冷却処理を開始し、ヒータ部3への電力の供給を停止（または低減）するなどして、降温動作を開始する。

【0036】次に、ウエハWの温度Tw1～Tw5が、目標

値（アンロードできる温度）に達したか否かを判別し、達していれば、降温処理を終了し、ウエハポート23をアンロードする。

【0037】以上説明したように、このバッチ式熱処理装置は、ウエハポート23に載置されているウエハWの温度Tw1～Tw5を数学モデルを用いて非接触で求め、その温度に基づいて、ヒータ部3を適応制御する。従って、適切な温度制御が可能となる。

【0038】また、温度レシビがゾーン毎に調整されているので、ガスの流れ、ガス密度の分布、温度勾配等による膜厚の差の発生を抑えることができる。

【0039】次に、モデル記憶部111に記憶されるモデルの設計手法について、説明する。まず、図5に示すように、温度センサSw1、Sw2、Sw3を中心からの距離がR₁、R₂、R₃の3箇所に配置したテスト用ウエハを5枚（ゾーン数分）用意する。R₁、R₂、R₃、Rは、次の関係を満たす。

$$K_1 \cdot \pi R_1^2 = K_2 \cdot \pi (R_2^2 - R_1^2) = K_3 \cdot \pi (R_3^2 - R_2^2) = K_4 \cdot \pi (R^2 - R_3^2)$$

【0040】Rはウエハの半径、K₁は、ウエハの中心からの距離（半径）がR₁の円で区切られた部分から得られる半導体素子（チップ）の歩留まり率、K₂は、ウエハの中心からの距離がR₁及びR₂である2つの同心円で区切られた部分の半導体素子（チップ）の歩留まり率、K₃は、ウエハの中心からの距離がR₂及びR₃である2つの同心円で区切られた部分の半導体素子（チップ）の歩留まり率、K₄は、ウエハの中心からの距離がR₃及びRである2つの同心円で区切られた部分の半導体素子（チップ）の歩留まり率である。なお、歩留まり率は、過去の経験値、実験値、統計値等から求められる。

【0041】即ち、ウエハの中心から温度センサの位置までを半径とする同心円で区切られた各エリアから、同一数の正常なチップが得られるような位置に温度センサSw1～Sw3を配置する。

【0042】より具体的に説明する。図6に模式的に示すように、加熱時には、ウエハWの端部が中心部よりも温度が高く、冷却時には、ウエハWの端部が中心部よりも温度が低くなる。このため、図7に示すように、ウエハWの中心部と端部は他のエリアに比べて良品率が低い（不良品率が高い）。そこで、ウエハWの中心からの距離と良品率（歩留率）とを統計的に求め、各同心円で区画される各領域内の良品チップの数が等しくなるように、温度センサSw1～Sw3を配置する。

【0043】次に、これらの5枚のテスト用ウエハが、図3（a）の5つのゾーンに1つずつ位置するように、テスト用ウエハと通常のウエハとをウエハポート23に載置する。次に、このウエハポート23を反応管2にロードする。次に、ヒータ31～35に高周波帯域の信号及び低周波帯域の信号を印加し、熱電対Sin1～Sin5及

びSout1～Sout5の出力、テストウエハ上の熱電対Sw1～Sw3の出力、ヒータ31～35に供給される電流などのデータを、例えば、1～5秒のサンプリング周期で取得する。

【0044】そして、ゾーン1～5のテストウエハについて、それぞれ、3つの熱電対Sw1～Sw3の出力が示す温度の平均値（各ウエハW上の3つの同心円上の温度の平均値）Tw1～Tw5を求めて記憶する。

【0045】次に、一定の温度範囲、例えば400℃～1100℃の範囲で、100℃間隔で温度帯域を設定する（広温度帯域を1つのモデルでカバーすると温度の推定などが不正確になってしまうため）。取得したデータから、各温度帯域について、数式4に示すARX（自動回帰）モデルを設定する。

【0046】

【数4】 $y_t + AA_1 y_{t-1} + AA_2 y_{t-2} + \dots + AA_n y_{t-n} = BB_1 u_{t-1} + BB_2 u_{t-2} + \dots + BB_n u_{t-n} + e_t$
 y_t ：時点tでの以下の内容を成分とするp行1列のベクトル

内容：熱電対Sin1～Sin5の出力の平衡温度 y_{bias} からの変動量（この例では5成分）、熱電対Sout1～Sout5の出力の平衡温度 y_{bias} からの変動量（この例では5成分）、ウエハの中心部にセットした熱電対Swcの出力の平衡温度 y_{bias} からの変動量（この例では5つ）、各テストウエハにセットした熱電対Sw1～Sw3の出力の平均値の平衡温度 y_{bias} からの変動量（この例では5つ）。従って、この例では、 y_t は15行1列のベクトルとなる。

u_t ：時点tでのヒータ電力平衡値 u_{bias} からの変動量を成分とするm行1列のベクトル（この例では、ヒータが5ゾーンのため、5行1列）。

e_t ：ホワイトノイズを成分とするm行1列のベクトル。

n：遅れ（例えば8）。

$AA_1 \sim AA_n$ ：p行p列の行列（この例では、15行15列）。

$BB_1 \sim BB_n$ ：p行m列の行列（この例では、15行5列）。

【0047】ここで、各係数 $AA_1 \sim AA_n$ と $BB_1 \sim BB_n$ を、最小二乗法などを用いて決定する。

【0048】求められたARXモデルを空間状態方程式で表現すると、数式5で示すようになる。

【数5】

$$A = \begin{bmatrix} -AA_1 & I_p & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -AA_n & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} BB_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ BB_n \end{bmatrix}$$

$$Kf = \begin{bmatrix} -AA_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ -AA_n \end{bmatrix}$$

$$C = [I \dots 0]$$

【0049】ここから、熱電対（Sin1～Sin5、Sout1～Sout5）、温度 T_{thermo} 、ヒータ電力 u_t からウエハ温度を推測するモデルを求める。数式4の出力 y_t を測定可能部分 S_t （ P_1 行1列）とウエハ温度 W_t （ P_2 行1列）に分ける。それに応じて、Cを C_S と C_W に分割し、 y_{bias} を S_{bias} と W_{bias} に分割する。ウエハ温度モデルは数式6により計算される。

【0050】

【数6】 $X_{t+1} = AX_t + BU_t + k_f e_t$

$S_t = C_S X_t + [I_p, 0] e_t$

上式に対して適切なリカッチ方程式を解き、フィードバックゲインLを求めると、ウエハ温度モデルは数式7で示すようになる。

【0051】

【数7】 $X_{t+1} = AX_t + B(U_t + U_{bias}) + L(T_{thermo} - C_S X_t + S_{bias})$

$T_{model, t} = C_W X_t + W_{bias}$

ここで、 $T_{model, t}$ が予測ウエハ温度である。

【0052】次に、テスト用ウエハを用いてウエハ温度を再度測定する。数式7に基づいて推定されたウエハ温度 T_{model} と実測値 T_{water} を比較し、モデルをチューニングする。このチューニング動作を必要に応じて複数回繰り返す。

【0053】実際の成膜形の処理速度を向上するため、作成したモデルの次数を10次程低次元化し、熱処理装置に実装する。

【0054】一方、CPU116の動作プログラムに関しては、温度の設定値から推測したウエハ温度の変動の時間平均を最小化するように動作を設定する。

【0055】次に、この数学モデルを校正するため、テスト用ウエハを処理し、数式7に基づいて推定されたウエハの温度と実測値（3つの熱電対Sw1～Sw3の出力が示す温度の平均値）とを比較し、モデルをチューニングする。このチューニング動作を必要に応じて複数回繰り返す。

【0056】一方、CPU116の動作プログラムに関しては、温度の設定値から推測したウエハ温度の変動の時間平均を最小化するように動作を設定する。

【0057】さらに、成膜処理の種類に応じて、各ゾーン内で均一な成膜が可能となるような温度目標軌道 $T_{traj}(t)$ 、すなわち、温度レシピを設計する。

【0058】続いて、5つのゾーンが全てこの温度目標軌道を追従するように制御を行ってテスト的に成膜処理を実行する。処理後、成膜された膜の厚さを測定し、膜厚のばらつき等をチェックする。例えば、ゾーン1のウエハの膜厚が下段のウエハの膜厚よりも小さい場合、直接的な原因は不明でも、ゾーン1の温度を相対的に上昇させることにより、膜厚をほぼ等しくすることができ。そこで、最小二乗法等を用いて、ばらつきが最も小さくなるように、温度目標軌道 $T_{traj}(t)$ を修正する。これが、図3(b)に示すようなゾーン毎の温度レシピである。この温度レシピをさらにチューニングすることも可能である。

【0059】このようにして、ウエハの温度推定及びウエハ温度を目標温度とするための出力を定義するモデルと、レシピがそれぞれ設定され、モデル記憶部111とレシピ記憶部112に記憶される。

【0060】その後、実際の成膜時に、これらのモデル及びレシピは適宜選択され、また読み出されて制御に使用される。

【0061】熱処理装置を稼働するにつれ、モデルによる推定温度と実際のウエハ温度にずれが生ずる場合がある。このような場合には、モデル作成時と同様に、加熱炉内にテスト用ウエハを配置し、モデルを用いた推定温度 $T_{estimate}$ とテスト用ウエハ上に配置された熱伝対 $S_{w1} \sim S_{w3}$ の出力の平均値が示す温度 T_{real} とを比較する。そして、例えば、実測温度 T_{real} に基づいて推定温度 $T_{estimate}$ を校正するようにしてもよい。例えば、推定温度 $T_{estimate}$ が実測温度 T_{real} よりも、 ΔT だけ、高い温度を示す場合には、推定温度を $T_{estimate} - \Delta T$ に補正するようにモデルを校正する。また、推定温度 $T_{estimate}$ が実測温度 T_{real} の k 倍の温度を示す場合には、推定温度を $T_{estimate}/k$ に補正するようにモデルを校正する。さらに、 $T_{estimate} = f(T_{real})$ 、(f は関数) の関係にある場合には、モデルの最終的な温度推定値が $T_{estimate}'$ が、 $T_{estimate}' = f^{-1}(T_{estimate})$ となるように、その出力を校正してもよい。

【0062】以上、この発明の実施の形態に係るバッチ式の熱処理装置及びその適応制御方法、さらに、制御に使用するモデルの設計・校正手法を説明したが、この発明は上記実施の形態に限定されず種々の変形及び応用が可能である。

【0063】例えば、モデルとしては、上述の例に限定されず、熱電対 $S_{in1} \sim S_{in5}$ 及び $S_{out1} \sim S_{out5}$ の出力(測定値)及びヒータ31～35への供給電力などが

ら、ウエハWの温度を推測し、さらに、推測した温度の組を目的とする温度とするために、ヒータ31～35に供給する電力を特定可能な数学モデルならば任意のモデル(多変数、多次元、多出力関数)を利用可能である。

【0064】また、テスト用ウエハに3つの熱伝対を配置する例を示したが、熱伝対の数は、2以上ならば任意である。例えば、 n (複数)の温度センサを使用する場合に、ウエハの中心を中心とする n 個の同心円上に温度センサを配置する。 n 個の同心円の半径は、 n 個の同心円により、ウエハ上に形成される $n+1$ 個の領域から、同一数の正常な半導体チップが得られるような位置とする。

【0065】上記実施の形態では、窒化膜形成用の熱CVD装置を例にこの発明を説明したが、処理の種類は任意であり、他種類の膜を形成するCVD装置、酸化装置、エッチング装置、等の様々なバッチ式熱処理装置に適用可能である。ただし、種類毎に、モデルとレシピを設計する。

【0066】また、機器構成や動作も上記実施の形態に限定されない。例えば、上記実施の形態では、ヒータの数と反応管2内のゾーンを5つとしたが、ヒータの数や温度ゾーンの数も任意である。また、ヒータは、電気抵抗型のものに限定されず、ランプなどでもよい。また、温度を測定するための構成も熱電対に限定されず、任意の温度センサを適用可能である。

【0067】また、全ての装置について、モデルを個々に設計するのは煩雑であり、同一仕様の熱処理装置について1つのモデルを作成し、これを装置毎に校正することにより、モデルを共通化してもよい。この方法によれば、モデルの作成とチューニングを効率よく行うことができる。

【0068】

【発明の効果】以上説明したように、この発明によれば、熱処理装置又は数学モデルを適切に校正して、被処理体に適切に熱処理を施すことができる。また、バッチ式熱処理装置用の温度推定数学モデルを適切に生成し、校正することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明の実施の形態に係る熱処理装置の構造を示す図である。

【図2】制御部の構成例を示す回路図である。

【図3】(a)は反応管内のゾーンを示し、(b)はゾーン別の目標温度軌道の例を示す図である。

【図4】熱処理の工程を説明するためのフローチャートである。

【図5】テスト用ウエハ上の熱伝対(温度センサ)の配置位置を説明するための図である。

【図6】ウエハの温度分布を説明するための図である。

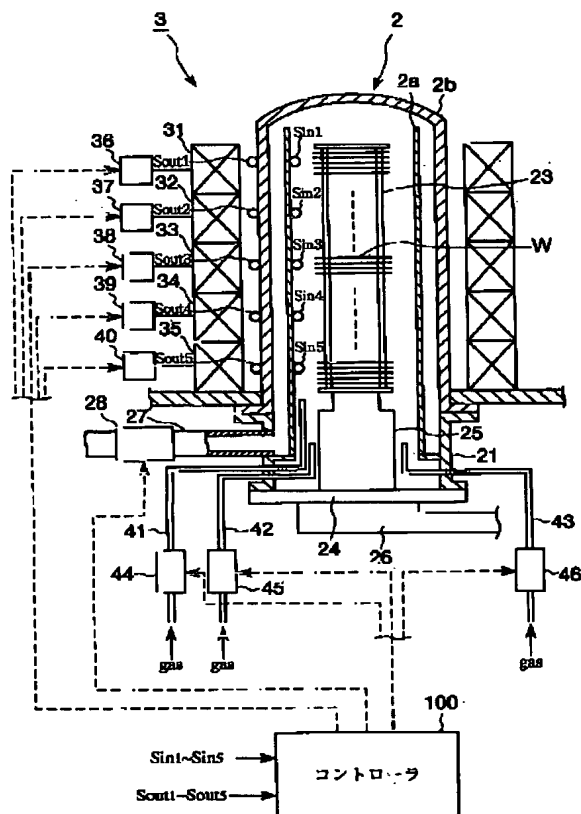
【図7】ウエハ上の半導体チップの歩留まり率を説明するための図である。

【符号の説明】

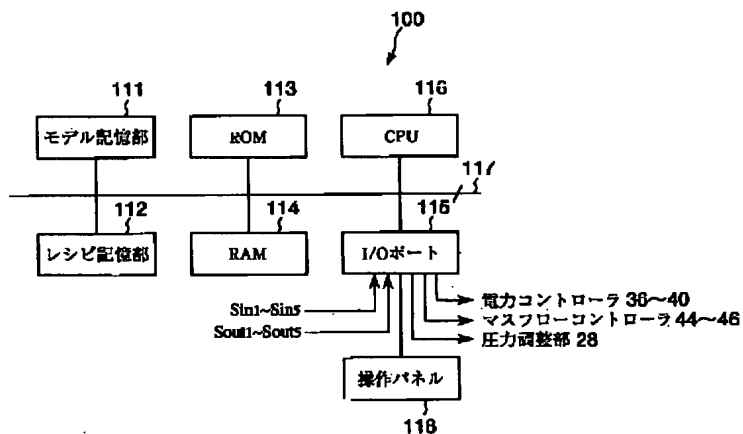
2 反応管
3 ヒータ部
21 マニホールド
23 ウエハポート
24 蓋体
25 保温筒（断熱体）

31 上段ヒータ
32 上中断ヒータ
33 中段ヒータ
34 下中段ヒータ
35 下段ヒータ
36～40 電力コントローラ

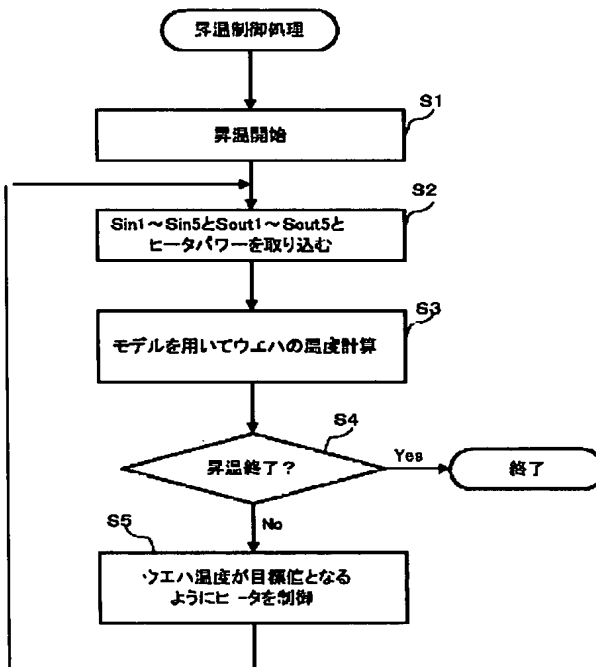
【図1】



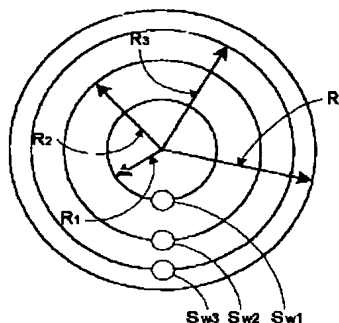
【図2】



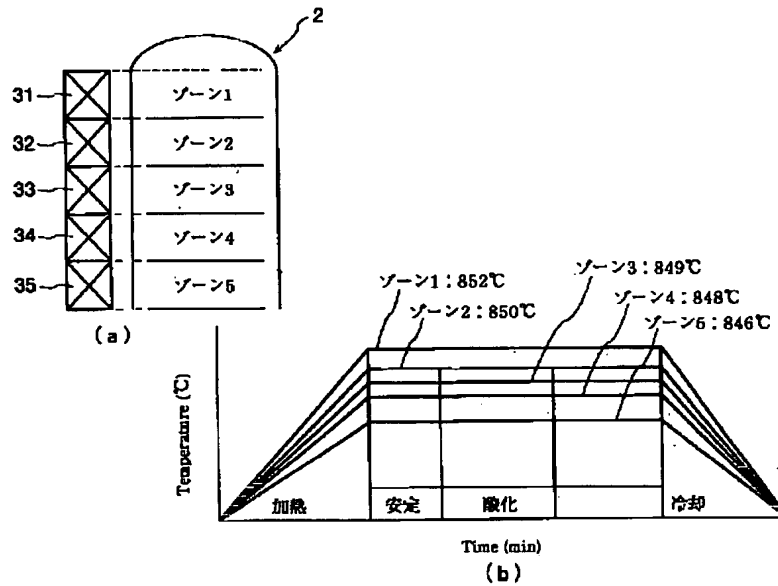
【図4】



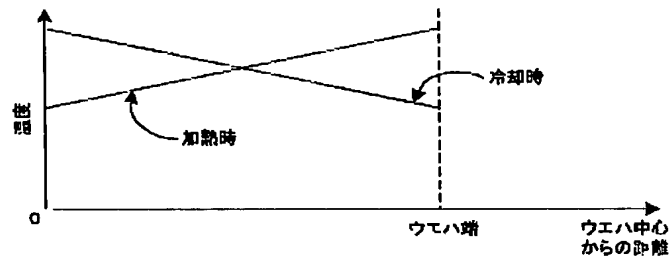
【図5】



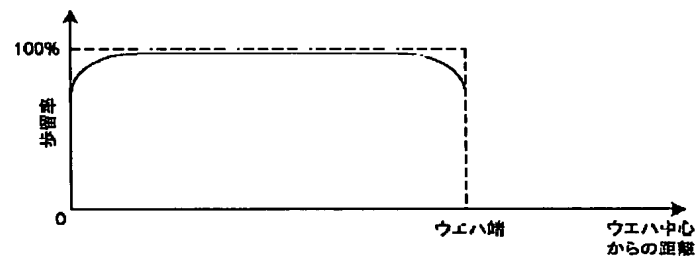
【図3】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 坂本 浩一
神奈川県津久井郡城山町町屋1丁目2番41
号 東京エレクトロン東北株式会社相模事
業所内

(72)発明者 安原 もゆる
東京都港区赤坂五丁目3番6号 東京エレ
クトロン株式会社内
Fターム(参考) 4K056 AA09 BB06 CA18 FA04 FA12